

*А.В. ГРАБОВСЬКИЙ, М.А. ТКАЧУК, О.Ю. ШУТЬ, А.І. ЛІПЕЙКО, Г.В. ЦЕНДРА,
А.В. ШЕВЧЕНКО, О.С. ЛЬОЗНИЙ, Д.В. МОСНИЦЬКА, Ю.С. ЧАЛА*

АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ КОРПУСІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ВЛАСНІ ЧАСТОТИ І ФОРМИ КОЛИВАНЬ

У роботі описано підхід до аналізу впливу параметрів корпусів транспортних засобів спеціального призначення на власні частоти і форми коливань. Для цього побудовані параметричні моделі корпусів. У цих корпусах варіюваними є їх структура, форма та товщини окремих панелей. У ході дослідження макетів корпусів проаналізовано зміну власних частот і форм коливань корпусів транспортних засобів спеціального призначення. Побудовані моделі дають можливість прогнозувати тенденції зміни власних частот і форм коливань при проектному варіюванні окремих параметрів корпусів. Це створює переваги при обґрунтуванні раціональних технічних рішень цих корпусів шляхом цілеспрямованого варіювання окремих параметрів.

Ключові слова: коливання; власна частота коливань; власна форма коливань; корпус; транспортний засіб спеціального призначення; скінчено-елементний аналіз; напружено-деформований стан; чутливість

*А.В. ГРАБОВСКИЙ, Н.А. ТКАЧУК, А.Ю. ШУТЬ, А.И. ЛИПЕЙКО,
Г.В. ЦЕНДРА, А.В. ШЕВЧЕНКО, О.С. ЛЕЗНИЙ, Д.В. МОСНИЦКАЯ, Ю.С. ЧАЛАЯ*

АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОРПУСОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ

В работе описан подход к анализу влияния параметров корпусов транспортных средств специального назначения на собственные частоты и формы колебаний. Для этого построены параметрические модели корпусов, в которых варьируемыми является их структура, форма и толщины отдельных панелей. В ходе исследования макетов корпусов проанализировано изменение собственных частот и форм колебаний корпусов транспортных средств специального назначения. Построенные модели дают возможность прогнозировать тенденции изменения собственных частот и форм колебаний при проектном варьировании отдельных параметров корпусов. Это создает преимущества при обосновании рациональных технических решений этих корпусов путем целенаправленного варьирования отдельных параметров.

Ключевые слова: колебания; собственная частота колебаний; собственная форма колебаний; корпус; транспортное средство специального назначения; конечно-элементный анализ; напряженно-деформированное состояние; чувствительность

*A. GRABOVSKIY, M. TKACHUK, O. SHUT, A. LIPEIKO,
G. TSENDRA, A. SHEVCHENKO, O. LOZNYI, D. MOSNITSKA, Yu. CHALA*

ANALYSIS OF INFLUENCE TRENDS OF SPECIAL PURPOSE VEHICLE HULLS PARAMETERS ON NATURAL FREQUENCIES AND OSCILLATIONS FORMS

The paper describes the approach to the analysis of the influence of the parameters of special purpose vehicles hulls on the natural frequencies and forms of oscillations. For this purpose, parametric models of hulls are constructed. In these hulls, their structure, shape and separate panels thickness are varied. In the course of research of hulls scale models, the change of natural frequencies and forms of fluctuations of special purpose vehicles hulls is investigated. The constructed models make it possible to predict the trends of natural frequencies and forms of oscillations in the design variation of hulls individual parameters. Thus advantages are creating in substantiating rational technical solutions of these hulls by purposeful variation of separate parameters.

Keywords: oscillations; natural frequency of oscillations; own form of oscillations; hull; special purpose vehicles; finite element analysis; stress-strain state; sensitivity

Вступ. При розробці транспортних засобів спеціального призначення (бронетранспортери, бойові машини піхоти (БМ), танки тощо) загострилася ситуація із дослідженням та забезпеченням міцності їхніх елементів. Це також стосується тих проблем з бронетанковою технікою, які склалися в Україні. На найближчу перспективу обороноздатність країни базуватиметься на вітчизняних бойових броньованих машинах (БМ), що експлуатуються, модернізуються чи розробляються. Традиційні зразки техніки (танки Т-64, бронетранспортери БТР-60, 70, 80) на сьогодні не відповідають за тактико-технічними характеристиками (ТТХ) вимогам сучасних умов бойового застосування. Це стосується захищеності корпусів, потужності двигунів, можливостей трансмісії, міцності підвіски, стійкості гарматного озброєння тощо. Виникають дві проблеми: модернізація та створення нових БМ. Бронетанкобудування України освоєє обидва напрямки шляхом випуску БТР-3, БТР-4, модернізованих БТР-80, БМ «Булат», БМ «Оплот» тощо. Бар'єрною перешкодою для проривного зростання їхніх ТТХ є відсутність нових технічних рішень, що базуються на новітніх конструктивних формах, матеріалах та технологіях. Натепер ця проблема примножується тим, що відсутні сучасні потужні підходи, моделі та методи досліджень

таких об'єктів із новими технічними рішеннями. Тому доцільним є здійснення розробки, у якому такі дослідження передбачені на основі розвитку та вдосконалення відповідних унікальних комплексних математичних і чисельних моделей та методів. Без таких досліджень будь-які частинні рішення є неефективними. Якраз поєднання підходів механіки, математичної фізики та чисельних методів створює можливість розв'язання актуальних, важливих та кричущо необхідних завдань для науки та спеціального транспортного машинобудування. Зокрема, одним із важливих аспектів цих досліджень є аналіз впливу проектних параметрів на власні частоти і форми коливань корпусів транспортних засобів спеціального призначення. Це сформувало напрямок і зміст цієї роботи.

Аналіз існуючих напрямків розроблення та дослідження елементів транспортних засобів спеціального призначення. У роботах багатьох вчених [1–10] здійснено аналіз існуючих моделей та методів досліджень реакції БМ на дію різних чинників. При цьому вони розв'язують низку задач підвищення ТТХ вітчиз-

© А.В. Грабовський, М.А. Ткачук, О.Ю. Шуть,
А.І. Ліпейко, Г.В. Цендра, А.В. Шевченко,
О.С. Льозний, Д.В. Мосницька, Ю.С. Чала, 2020

няних ББМ. Проте у багатьох випадках ними використані відомі розроблені моделі та методи дослідження фізико-механічних процесів та станів, які не повністю відповідають сучасним вимогам. Отже, ці розробки потребують суттєвого поглиблення саме у частині нових методів і моделей, придатних для нових технічних рішень у перспективних ББМ. Разом із тим навіть відомі існуючі зарубіжні розробки в галузі озброєння та військової техніки [11–15] в силу їхньої конфіденційності не завжди є доступними вітчизняним дослідникам. Становище не виправляє також застосування сучасних потужних методів і засобів комп'ютерного моделювання, оскільки у випадку ББМ маємо справу із специфічними об'єктами досліджень, які потребують додаткових розробок для адаптації засобів чисельного моделювання до цієї предметної області.

Підсумовуючи, можна зазначити, що розробки вітчизняних та закордонних вчених [1–7, 10–20] не вирішують посталої проблеми повною мірою, хоча їх, безумовно, потрібно інтегрувати у вітчизняні розробки. Таким чином, для усунення протиріччя між наявними можливостями науки та потребами практики є конче необхідними дослідження фізико-механічних процесів і станів елементів транспортних засобів спеціального призначення. Зокрема, важливим аспектом є адаптація та переведення теоретичних розробок механіки у предметну область озброєння та військової техніки, а також їхній подальший розвиток стосовно нових матеріалів, технологій зміцнення та геометричних форм. Відповідно, в кінцевому підході досягається підвищення ТТХ ББМ. Саме на цій базі можлива розробка нових та модернізованих танків, бронетранспортерів, БМП з ТТХ світового рівня, що здатні протистояти сучасним засобам озброєння противника.

Одним із таких напрямків є, зокрема, аналіз власних частот і форм коливань елементів транспортних засобів спеціального призначення.

Мета роботи – розробка та реалізація нових підходів до аналізу впливу проектних параметрів на власні частоти і форми коливань корпусів транспортних засобів спеціального призначення.

Загальний підхід до вирішення поставлених завдань. На розвиток підходів, які були започатковані у роботах [8, 9, 21–24], у цій роботі пропонується розвинути, удосконалити та адаптувати метод узагальненого параметричного моделювання для дослідження фізико-механічних процесів і станів у елементах бойових броньованих машин. Принциповою відмінністю методології, що розробляється, є те, що у множині чинників, які приймаються як визначальні, ідентуються проектно-технологічно-виробничі чинники. Цим самим охоплюється значна частина життєвого циклу [8, 9, 21–24].

Таким чином, узагальнений параметричний простір P при синтезі нових проектно-технологічних рішень поповнюється новою підмножиною P_{Pr} :

$$P = P_P \cup P_T \cup P_{Pr} \cup P_E, \quad (1)$$

де P_P , P_T , P_E – множина проектних, технологічних та експлуатаційних (у т.ч. – режими бойового застосування та чинники ураження) параметрів відповідно;

P_{Pr} – множина виробничих чинників.

Запропонований підхід об'єднує задачі аналізу

фізико-механічних процесів, станів та властивостей досліджуваних об'єктів, з одного боку, та задач обґрунтування проектних параметрів проєктованих виробів, – з іншого. В основу таких можливостей закладена варіативність проектних і технологічних рішень, а також умов експлуатації та режимів бойового застосування транспортних засобів спеціального призначення.

Розроблений підхід націлений на реалізацію у вигляді відповідного спеціалізованого програмно-модельного комплексу. Такий комплекс поєднує:

- спеціалізовані модулі, які продукують за певним набором параметрів досліджуваній об'єкт у вигляді чисельної моделі;

- універсальний пакет комп'ютерного моделювання типу Creo, SolidWorks, ANSYS та Femap, у яких формуються геометричні та скінченно-елементні моделі, а також здійснюється розрахунок фізико-механічних процесів і станів у досліджуваних об'єктах;

- спеціалізовані модулі для аналізу результатів цих розрахунків та прийняття рішення про завершення або продовження цілеспрямованого варіювання проектних параметрів.

Така побудова процесу проектних досліджень дає можливість поєднати переваги потужності універсальних та цілеспрямованості спеціалізованих програмних засобів комп'ютерного моделювання.

Динамічні властивості елементів бойових броньованих машин. Однією із сторін розв'язання поставленої задачі є аналіз динамічних властивостей елементів транспортних засобів спеціального призначення. З цією метою вводиться до розгляду скінченно-елементна модель досліджуваного об'єкта. Тоді його можна подати у вигляді динамічної системи із N ступенями вільності. Ототожнюючи вузлові параметри скінченних елементів із узагальненими координатами, кінетичну T і потенціальну Π енергію цієї системи можна записати наступним чином:

$$T = \frac{1}{2} \dot{U}^T M \dot{U}, \quad (2)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} U^T K U, \quad (3)$$

де K , M – матриці жорсткості та мас,

U , \dot{U} – вектори узагальнених (вузлових) перемішень та швидкостей.

Скориставшись технологією складання рівнянь малих коливань системи зі скінченною кількістю ступенів вільності (на основі рівнянь Лагранжа 2-го роду), отримуємо для вільних коливань:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{U}_k} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial U_k} = 0 \Rightarrow M \ddot{U} + K U = 0. \quad (4)$$

Поданою нетривіальний розв'язок (4) у вигляді

$$U = \mu \sin \omega t, \quad (5)$$

отримуємо для визначення власних форм μ_s і власних частот ω_s коливань наступні співвідношення:

$$(K - \omega^2 M) \mu = 0; \quad \det(K - \omega^2 M) = 0. \quad (6)$$

Із (6) визначається спектр ω_s , $s = 1, 2, \dots$ та відпові-

дний їм набір μ_s .

Звертаючись до того, що сам досліджуваний об'єкт визначається сукупністю узагальнених параметрів p , то і результати розв'язання (6) залежні від P :

$$\omega_s = \omega_s(p); \mu_s = \mu_s(p). \quad (7)$$

Тоді за допомогою співвідношень (6), (7) можливо розв'язати задачі аналізу динамічних характеристик елементів технологічно-виробничих систем, а за допомогою обернених до (7) – задачу синтезу їхніх параметрів за критерієм відлаштування від резонансних режимів.

Аналіз власних частот і форм коливань корпусів транспортних засобів спеціального призначення. Визначення впливу варіювання проектних параметрів на спектр власних частот і форм коливань здійснено на прикладі макетного зразка корпусу бронетранспортера БТР-3Е. За формою та габаритами цей макет нагадує реальну конструкцію, а як номінальний – має набір однакових товщин панелей у всіх проєкціях. Для визначеності фізико-механічних характеристик матеріалу корпусу обрано Сталь 40.

Такий макет має на меті продемонструвати можливості моделювання та відобразити тенденції зміни спектру власних частот і форм коливань, які при цьому спостерігаються для подібного типу реальних конструкцій.

Основним видом навантаження бронекорпусів легкоброньованих машин типу БТР-3Е є динамічні сили, які діють із боку бойових модулів та підвіски відповідно при здійсненні пострілів із малокаліберних автоматичних гармат, що ними оснащені бойові модулі цих машин, а також при подоланні нерівностей у процесі руху на місцевості. Відтак, бронекорпус зазнає впливу височастотного збурення від полічастотних сил зі стабільним або стохастичним часовим розподілом. Реакція бронекорпусів на дію цих сил як динамічних систем залежить від спектра їх власних частот і

форм коливань. Відповідно, потрібно здійснювати аналіз впливу певних параметрів на ці спектри.

З цієї метою були побудовані параметричні моделі бронекорпусів БТР-3Е із умовно обраною номінальною товщиною усіх панелей 7 мм. Як варійовані були визначені товщини бронепанелей у різних проєкціях корпусу.

Було здійснене узгоджене варіювання усіх товщин бронекорпуса (рис. 1) у діапазоні $\alpha = h/h_0 \in [0,8; 1,2]$, де α – безрозмірний параметр, h – поточна товщина певної бронепанелі, h_0 – її номінальна товщина (див. рис. 1), тобто із стонщування на 20% до потовщення на 20%.

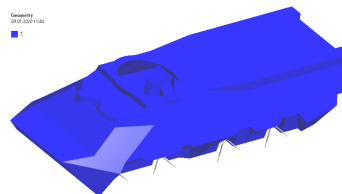


Рисунок 1 – Карти товщин бронекорпуса БТР-3Е із товщиною усіх панелей 7 мм

У табл. 1–5 та на рис. 2, 3 наведені результати досліджень. Видно, що при варіюванні α змінюється і спектр частот, і форми коливань. Перша обставина важлива з огляду на відлаштування від резонансних режимів, а друга – с точки зору мінімізації збудливості тих чи інших форм при дії певних збурювальних сил (за неможливості відлаштування від них за частотою).

Виявлені особливості дають підстави для висновку про те, що проектні параметри чинять сильний вплив на динамічні характеристики корпусів легкоброньованих машин. При цьому різні складові спектра частот ведуть себе по-різному при варіюванні цих параметрів. Оскільки, наприклад, при варіюванні товщин бронепанелей у різних проєкціях по-різному змінюються компоненти матриць мас та жорсткостей, то різні власні частоти зміщуються на частотній осі у різні напрямки із різною швидкістю.

Таблиця 1 – Власні частоти і форми коливань бронекорпуса БТР-3Е із картою товщин бронепанелей при $\alpha = 0,8$ (тобто –20% від умовно номінальних)

№	Частота, Гц	Шкала переміщення, мм	Форми коливань	
			Вид із верхньої проєкції	Вид із нижньої проєкції
1	5,7	1,1305 Max 1,0053 0,88015 0,75498 0,62981 0,50464 0,37948 0,25431 0,12914 0,0039759 Min		
6	10,0	0,8369 Max 0,79643 0,75596 0,71549 0,67502 0,63455 0,59408 0,5536 0,51313 0,47266 Min		
15	29,5	5,1962 Max 4,6195 4,0427 3,466 2,8892 2,3124 1,7357 1,1589 0,58219 0,0054376 Min		

Закінчення табл. 1

№	Частота, Гц	Шкала переміщень, мм	Форми коливань	
			Вид із верхньої проєкції	Вид із нижньої проєкції
20	32,0			

Таблиця 2 – Власні частоти і форми коливань бронекорпуса БТР-3Е із картою товщин бронепанелей при $\alpha = 0,9$ (тобто –10% від умовно номінальних)

№	Частота, Гц	Шкала переміщень, мм	Форми коливань	
			Вид із верхньої проєкції	Вид із нижньої проєкції
1	5,35			
6	9,53			
13	28,25			
17	32,73			

Таблиця 3 – Власні частоти і форми коливань бронекорпуса БТР-3Е із картою товщин бронепанелей при $\alpha=1,0$ (тобто за умовно номінальних)

№	Частота, Гц	Шкала переміщень, мм	Форми коливань	
			Вид із верхньої проєкції	Вид із нижньої проєкції
1	5,08			
22	38,84			

№	Частота, Гц	Шкала переміщень, мм	Форми коливань	
			Вид із верхньої проєкції	Вид із нижньої проєкції
24	43,83			

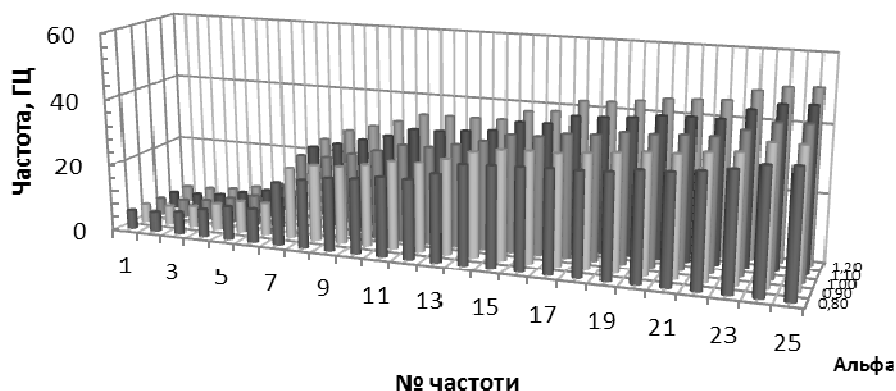
Таблиця 4 – Власні частоти і форми коливань бронекорпуса БТР-3Е із картою товщин бронепанелей при $\alpha=1,1$ (тобто +10% від умовно номінальних)

№	Частота, Гц	Шкала переміщень, мм	Форми коливань	
			Вид із верхньої проєкції	Вид із нижньої проєкції
1	4,85			
15	36,64			
16	36,86			
22	41,89			

Таблиця 5 – Власні частоти і форми коливань бронекорпуса БТР-3Е із картою товщин бронепанелей при $\alpha = 1,2$ (тобто +20% від умовно номінальних)

№	Частота, Гц	Шкала переміщень, мм	Форми коливань	
			Вид із верхньої проєкції	Вид із нижньої проєкції
1	4,64			
6	8,37			

№	Частота, Гц	Шкала переміщень, мм	Форми коливань	
			Вид із верхньої проекції	Вид із нижньої проекції
15	38,1	3,9083 Max 3,4755 3,0426 2,6098 2,1769 1,7441 1,3112 0,87837 0,44552 0,012666 M		
16	38,73	1,4861 Max 1,3218 1,1574 0,99296 0,82856 0,66417 0,49977 0,33537 0,17098 0,0065816 Min		
20	44,67	2,9867 Max 2,6552 2,3238 1,9924 1,6609 1,3295 0,99806 0,66662 0,33519 0,0037566 Min		
21	45,08	2,5029 Max 2,2262 1,9495 1,6728 1,3961 1,1194 0,84268 0,56597 0,28926 0,012554 M		

Рисунок 2 – Залежність власних частот коливань від коефіцієнта α (Альфа)

Аналіз результатів. Важливою обставиною є зміна не тільки власних частот, але й власних форм коливань. Зокрема, бажаною є тенденція переміщення зон деформацій та напружень (на нижніх власних частотах) із верхньої проекції на бокові. Завдяки цьому розвантажуються підбаштовий лист, знижуються динамічні навантаження на бронекорпус, а також зменшуються збурення на системи наведення і стабілізації озброєння бойового модуля.

Для визначення раціональних карт товщин бронепанелей бронекорпусів легкоброньованих машин необхідно здійснювати дослідження із формуванням певних критеріїв за динамічними характеристиками.

У процесі досліджень напружено-деформованого стану та динамічних властивостей елементів транспортних засобів спеціального призначення були визначені закономірності, які дають підстави для розробки низки рекомендацій стосовно підвищення тактико-технічних характеристик елементів, систем, агрегатів і машин у цілому.

Для підвищення рівня власних частот коливань бронекорпусів легкоброньованих машин рекомендується здійснювати паралельно із потовщенням бронепанелей також підсилення внутрішньої силової структури. Це дає можливість різко збільшити значення нижніх власних частот коливань. Крім того, першочергово

увагу потрібно приділити відлаштуванню власних частот коливаль, які відповідають за переважну локаліза-

цію деформацій і напружень на власних формах у верхній проекції корпусу, від частот збудження.

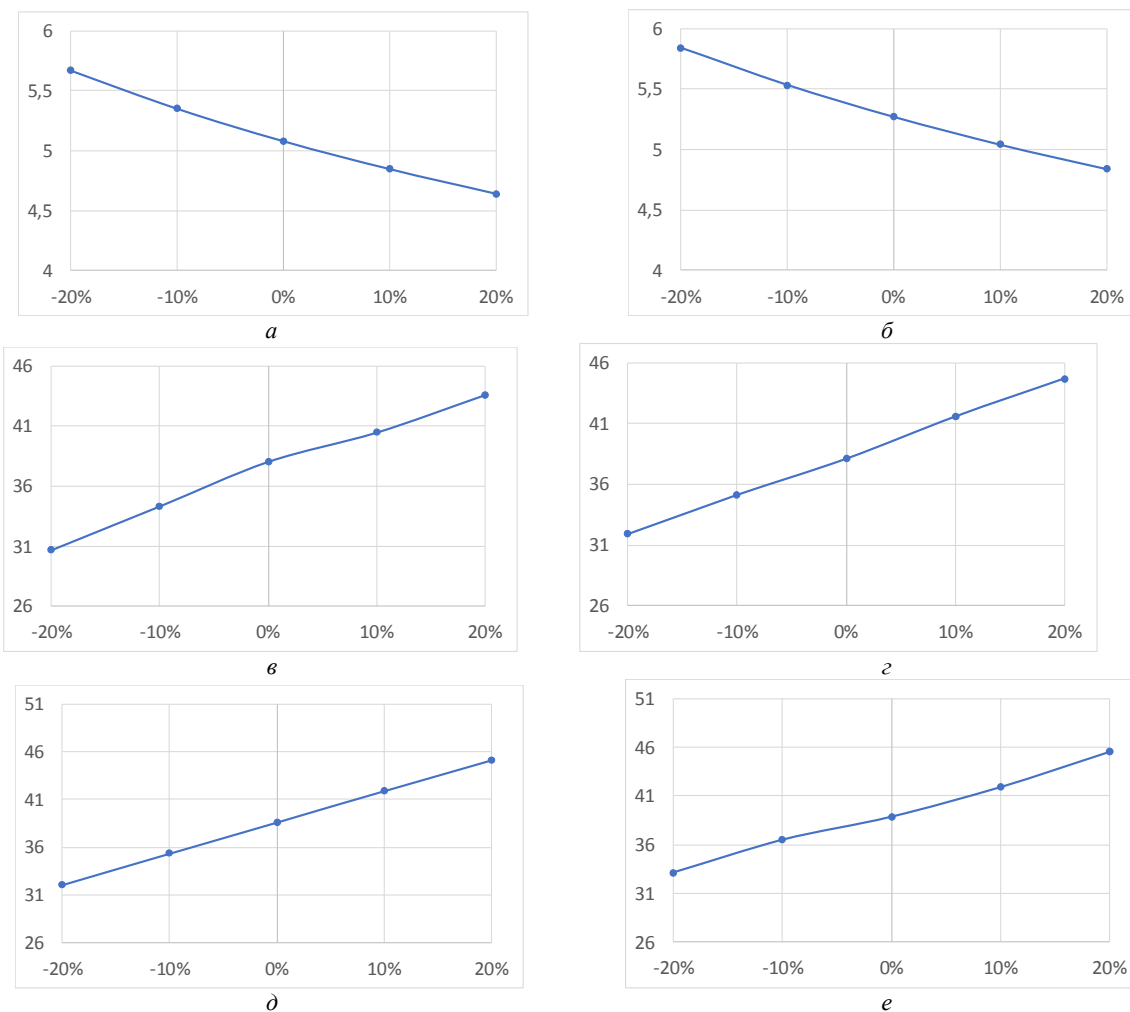


Рисунок 3 – Тенденції зміни нижчих власних частот коливаль (Гц) при зміні товщини бронепанелей від умовно номінальної:

a – 1-а власна частота; *б* – 2-а власна частота; *в* – 19-а власна частота;
г – 20-а власна частота; *д* – 21-а власна частота; *е* – 22-а власна частота

Висновки. За результатами здійснених досліджень можна зробити наступні висновки.

1. У роботі здійснено розвиток методів узагальненого параметричного моделювання фізико-механічних процесів і станів елементів транспортних засобів спеціального призначення з метою обґрунтування проектно-технологічних параметрів для забезпечення підвищених тактико-технічних характеристик перспективних машин.

2. Розроблені методи параметричного моделювання та формування поповненого параметричного простору для ідентифікації транспортних засобів спеціального призначення як об'єкту досліджень за рахунок проектних параметрів, режимів бойового застосування та тактико-технічних характеристик. Це дає можливість поєднати у єдиних моделях варіювані параметри та критеріальні величини. У результаті забезпечується переваги, порівняно із традиційними підходами, у розв'язанні, з одного боку, задач аналізу процесів і станів елементів транспортних засобів спеціального призначення, а з іншого, – у обґрунтуванні раціональних технічних рішень задля підвищення їх технічного рівня.

3. Установлені закономірності впливу проектних

параметрів на технічні характеристики корпусів транспортних засобів спеціального призначення дають змогу розробляти рекомендації щодо технічних рішень задля забезпечення показників міцності. Зокрема, це залежності зміни зон максимумів та мінімумів напружень та переміщень макетів бронекорпусів БТР-3Е на резонансних режимах коливаль.

Таким чином, удосконалені підходи, методи, моделі, а також одержані в ході досліджень результати створюють передумови для подальшого просування у напрямку розвитку теорії дослідження процесів і станів у складних механічних системах та практики проектування елементів транспортних засобів спеціального призначення, зокрема, при розробці та виготовленні легкоброньованих машин на вітчизняних підприємствах.

Список літератури

1. *Методология исследования сложных систем военного назначения* / [С. В. Лапицкий и др.]; под ред. С. В. Лапицкого. 2013. 477 с.
2. Чепков І.Б., Нор П.І. Загальні тенденції розвитку озброєння та військової техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2014. № 1. С. 4–13.
3. Чепков І.Б. Основні напрями розвитку озброєння і військової

- техніки. *Перспективи науково-технологічного забезпечення ОПК України: Інформ.–комунік. захід (Київ, 22-23 вересня 2015)*. К.: ТОВ «Міжн. вист. центр», 2015. С. 8–13.
4. Веретеников А.И., Глебов В.В. Колесные бронированные машины для эффективного выполнения боевых задач. *Перспективы развития озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції*. Львів: АСВ, 2015. С. 7.
 5. Бісик С.П. Концепція побудови бойових броньованих машин з підвищеним рівнем протимінного захисту. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції*. Львів: АСВ, 2015. С. 15.
 6. Чепков І. Б. Основні аспекти формування державної воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції*. Київ, Видавництво ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. – С.21–23.
 7. Васківський М. І. Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ Збройних Сил України на сучасному етапі. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції*. Київ, Видавництво ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С.97.
 8. Ткачук Н.А., Чепурной А.Д., Грищенко Г.Д. [и др.] Основы обобщенного параметрического описания сложных механических систем. *Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля*. 2007. № 9(115), част. 1. С. 196–205.
 9. Литвиненко А.В. Общий подход к проектно-технологическому обеспечению тактико-технических характеристик военных колесных и гусеничных машин путем обоснования параметров бронекорпусов по критериям прочности и защищенности. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків: НТУ «ХПІ». 2014. №29 (1072). С. 68–77.
 10. Дущенко В. В., М. С. Ярмак, А. О. Маслієв, Цимбал Г. І. Методика розрахунку динамічної навантаженості гідропневматичної підвіски колісної легкоброньованої машини. *Механіка та машинобудування*. 2018. №1. С. 75–80.
 11. Erdik A., Kilic S. A., Kilic N., Bedir S. Numerical simulation of armored vehicles subjected to undercarriage landmine blasts. *Shock Waves*, 2015.
 12. Fleming B. P. The Hybrid Threat Concept: Contemporary War, Military Planning and the Advent of Unrestricted Operational Art [Електронний ресурс].
 13. *The Army's Ground Combat Vehicle Program and Alternatives*. Congressional Budget office. 2013 42 p. April. URL: <http://www.cbo.gov/publication/44044>.
 14. Feickert Andrew. *Infantry Brigade Combat Team (IBCT) mobility, reconnaissance, and firepower programs*. Washington, DC: Congressional Research Service, 2017. 30 p.
 15. Kempinski B., Murphy C. Technical Challenges of the US Army's Ground Combat Vehicle. *Program Congressional Budget Office (US Congress)*. Washington DC. 2012. Working Paper 2012–15. 66 p.
 16. Толстолуцкий В.А., Павлюченко А.А., Рассказов И.И., Толстолуцкая Т.В. Сравнение водоходных качеств изделий БТР-3Е и БТР-4Е. *Механіка та машинобудування*. 2014. № 1. С. 128–135.
 17. Сіренко В. Є., Демченко Є. Я. Повний життєвий цикл озброєння та військової техніки у якості критеріальної ознаки програмно-цільового планування їх розвитку. *Озброєння та військова техніка*. 2019. Т. 22. №. 2. С. 3–15.
 18. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хоменко В. П. Дослідження конструктивних особливостей та тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин типу MRAP. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. № 1. С. 7–19.
 19. Крайник Л. В., Грубель М. Г., Яльніцький О. Д. Аналіз розвитку сучасних бойових колісних машин. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. № 1 (49). С. 126–131.
 20. Купріненко О. М. *Бойові броньовані машини. Концептуальні основи проектування* : моногр. Львів : НАСВ, 2017. 198 с.
 21. Хлань О. В., Ткачук М. А., Грабовський А. В. Теоретичні основи проектно-технологічно-виробничого забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2018. № 9 (1285). С. 83–89.
 22. Bondarenko M., Tkachuk M., Grabovskiy A., Hrechka I. Substantiation of thin-walled structures parameters using nonlinear models and method of response surface analysis. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2019. Vol. 44, pp. 32–43
 23. Ткачук М.А., Шейченко Р. І., Бондаренко М.О., Ткачук М.М., Грабовський А.В., Танченко А.Ю., Шеманська В.В., Хлань О.В., Шуть О.Ю., Малакей А.М. Забезпечення міцності тонкостінних конструкцій із підвищеними технічними характеристиками. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2019. № 7 (1332). С. 95–106.
 24. Ткачук М. А., Бондаренко М. О., Шейченко Р. І., Шуть О. Ю., Лісовол Я. М., Заворотній А. В., Набоков А.В. Новий підхід до проектування інноваційних тонкостінних конструкцій. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2019. № 7 (1332). С. 89–94.

References (transliterated)

1. *Metodologiya issledovaniya slozhnykh sistem voennogo naznacheniya* / [S. V. Lapitskiy i dr.]; pod red. S. V. Lapitskogo. 2013. 477 p.
2. Chepkov I.B., Nor P.I. Zagalni tendentsiyi rozvitku ozbroennya ta viyskovoyi tehnik. *ozbroennya ta viyskova tehnika*. 2014, no. 1, pp. 4–13.
3. Chepkov I.B. Osnovni napryami rozvitku ozbroennya i viyskovoyi tehnik. *Perspektivi naukovo-tehnologichnogo zabezpechennya opk ukrayini: inform.–komunik. zahid (Kyiv, 22-23 veresnya 2015)*. Kyiv: TOV «MZhn. vist. tsentr», 2015, pp. 8–13.
4. Veretennikov A.I., Glebov V.V. Kolesnyie bronirovannyye mashinyi dlya effektivnogo vyipolneniya boevyih zadach. *Perspektivi rozvitku ozbroennya ta viyskovoyi tehniky suhoputnih viysk: tezi dopovidey mizhnarodnoyi naukovo-tehnichnoyi konferentsiyi*. Lviv: ASV, 2015, pp. 7.
5. Bisik S.P. Kontseptsiya pobudovi boyovih bronovanih mashin z pidvischenim rivnem protiminnogo zahistu. *Perspektivi rozvitku ozbroennya ta viyskovoyi tehniky suhoputnih viysk: tezi dopovidey mizhnarodnoyi naukovo-tehnichnoyi konferentsiyi*. Lviv: ASV, 2015, pp. 15.
6. Chepkov I. B. Osnovni aspekty formuvannia derzhavnoi voienno-tehnichnoi ta obronno-promyslovoi polityky v Ukraini. *Problemy koordynatsii voienno-tehnichnoi ta obronno-promyslovoi polityky v Ukraini. Perspektivy rozvitku ozbroennya ta viyskovoyi tehniky: Tezy dopovidei mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*. Kyiv, Vydavnytstvo DNU UkrINTEI, 2017, pp.21–23.
7. Vaskivskiy M. I. Problemnii pytannia rozvitku ozbroennya ta viyskovoyi tehniky suhoputnykh viysk zbroinykh syl ukrainy na sushchasnomu etapi. *Problemy koordynatsii voienno-tehnichnoi ta obronno-promyslovoi polityky v ukraini. perspektivy rozvitku ozbroennya ta viyskovoyi tehniky: tezy dopovidei mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*. Kyiv, Vydavnytstvo DNU UkrINTEI, 2017, pp. 97.
8. Tkachuk N.A., Chepurnoi A.D., Hrytsenko H.D. [y dr.] Osnovy obobshchennoho parametrycheskoho opysanyia slozhnykh mekhanicheskyykh system. *Visnyk Skhidnoukr. nats. un-tu im. V.Dalia*. 2007, no. 9(115), chast. 1, pp. 196–205.
9. Lytvynenko A.V. Obshechiy podkhod k proektno-tehnologicheskomu obespecheniyu taktyko-tehnicheskyykh kharakterystyk voennykh kolesnykh y husenychnyykh mashyn putem obosnovanyia parametrov bronekorpusov po kryteryiam prochnosti y zashchyschennosti. *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut»*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2014, no.29 (1072), pp. 68–77.
10. Erdik A., Kilic S. A., Kilic N., Bedir S. Numerical simulation of armored vehicles subjected to undercarriage landmine blasts. *Shock Waves*, 2015,
11. Fleming B. P. *The Hybrid Threat Concept: Contemporary War, Military Planning and the Advent of Unrestricted Operational Art* [Електронний ресурс].
12. Dhatt G., Lefrançois E., Touzot G. *Finite Element Method*. Wiley-ISTE, 2012. 624 p.
13. *The Army's Ground Combat Vehicle Program and Alternatives*. Congressional Budget office. 2013 42 p. April. URL: <http://www.cbo.gov/publication/44044>.
14. Feickert Andrew. *Infantry Brigade Combat Team (IBCT) mobility, reconnaissance, and firepower programs*. Washington, DC: Congressional Research Service, 2017. 30 p.

15. Kempinski B., Murphy C. Technical Challenges of the US Army's Ground Combat Vehicle. *Program Congressional Budget Office (US Congress)*, Washington DC. 2012. Working Paper 2012–15. 66 p.
16. Tolstolutskiy V.A., Pavlyuchenko A.A., Rasskazov I.I., Tolstolutskaia T.V. Sravnenie vodohodnykh kachestv izdeliy BTR-3E i BTR-4E. *Mehanika ta mashinobuduvannya*. 2014, no. 1, pp. 128–135.
17. Sirenko V. E., Demchenko E. Ya. Povniy zhitteviy tsiki ozbroynnya ta viyskovoyi tehniki u yakosti kriterialnoyi oznaki programno-tsilovogo planuvannya yih rozvitku. *Ozbroennya ta viyskova tehnika*. 2019, T. 22, no. 2, pp. 3–15.
18. Grubel M. G., Kraynik L. V., Homenko V. P. Doslidzhennya konstruktivnih osoblivostey ta taktiko-tehnichnih karakteristik boyovih bronovanih mashin tipu MRAP. *Sistemi ozbroennya i viyskova tehnika*. 2018, no. 1, pp. 7–19.
19. Kraynik L. V., Grubel M. G., Yalnitkiy O. D. Analiz rozvitku suchasnih boyovih kollsnih mashin. *Sistemi ozbroennya i viyskova tehnika*. 2017, no. 1 (49), pp. 126–131.
20. Kuprinenko O. M. Boyovi bronovani mashini. Kontseptualni osnovi proektuvannya : monogr. Lviv : NASV, 2017. 198 p.
21. Hlan O. V., Tkachuk M. A., Grabovskiy A. V. Teoretichni osnovi proektno-tehnologichno-virobnichogo zabezpechennya taktiko-tehnichnih karakteristik boyovih bronovanih mashin. *Visnik Natsionalnogo tehnichnogo universitetu «Kharkivskiy politehnichniy institut»*. 2018, no. 9 (1285), pp. 83–89.
22. Bondarenko M., Tkachuk M., Grabovskiy A., Hrechka I. Substantiation of thin-walled structures parameters using nonlinear models and method of response surface analysis. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2019. Vol. 44, pp. 32–43
23. Tkachuk M.A., Sheychenko R. I., Bondarenko M.O., Tkachuk M.M., Grabovskiy A.V., Tanchenko A.Yu., Shemanska V.V., Hlan O.V., Shut O.Yu., Malakey A.M. Zabezpechennya mitsnostI tonkostInnih konstruktivnyh iz pIdvischenimi tehnichnimi karakteristikami. *Visnik Natsionalnogo tehnichnogo universitetu «Kharkivskiy politehnichniy institut»*. 2019, no. 7 (1332), pp. 95–106.
24. Tkachuk M. A., Bondarenko M. O., Sheychenko R. I., Shut O. Yu., Lisovol Ya. M., Zavorotniy A. V., Nabokov A.V. Noviy pIdhid do proektuvannya InnovatsIynih tonkostInnih konstruktivnyh. *Visnik Natsionalnogo tehnichnogo universitetu «Kharkivskiy politehnichniy institut»*. 2019., no. 7 (1332), pp. 89–94.

Надійшло (received). 12.03.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Грабовський Андрій Володимирович (Грабовский Андрей Владимирович, Grabovskiy Andrey) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Шуть Олександр Юрійович (Шуть Александр Юрьевич, Shut Oleksandr) – аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: tma@tmm-sapr.org

Ліпейко Андрій Іванович (Липейко Андрей Иванович, Lipeiko Andrii) – аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: tma@tmm-sapr.org

Цендра Георгій Вікторович (Цендра Георгий Викторович, Tsendra Heorgii) – аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна

Шевченко Андрій Валерійович (Шевченко Андрей Валерьевич, Shevchenko Andriy) – аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна

Льозний Олег Сергійович (Лезный Олег Сергеевич, Loznyi Oleg) – студент гр. МІТ87Б(ТМ), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: s1708@tmm-sapr.org

Мосницька Дар'я Валеріївна (Мосницкая Дарья Валериевна, Mosnitska Daria) – студентка гр. МІТ87Б(ТМ), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: s1710@tmm-sapr.org

Чала Юлія Сергіївна (Чалая Юлия Сергеевна, Chala Yuliia) – студентка гр. МІТ87Б(ТМ), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: s1713@tmm-sapr.org